

土石流水路実験結果を用いた 数値移動床水路による高濃度粒子群と水流の 力学的相互作用の検討

INVESTIGATION OF DYNAMIC INTERACTION OF HIGHLY CONCENTRATED
PARTICLES AND FLOW WITH A NUMERICAL MOVABLE-BED CHANNEL
USING RESULTS OF A FLUME EXPERIMENT ON DEBRIS FLOW

福田朝生¹・福岡捷二²

Tomoo FUKUDA and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授(〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

²フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授(同上)

This paper presents the applicability of a numerical movable-bed channel as a prediction tool for dynamic interactions of flow and particle motions. Motions of flow and particles represented in the numerical movable-bed channel provided a good explanation for vertical distributions of particle velocity and concentration measured in a flume experiment on debris flow. We investigated effects of particle shapes and coefficients of contact forces (coefficients of restitutions and resistant friction angles) in the DEM method on simulated motions of flow and particles. Simulated motions of flows and spheres in the numerical movable-bed channel by using different coefficients of contact forces were not able to represent simulated motions of flow and gravel particles. We also studied forces exerted on flow and particles. Streamwise fluid forces on particles predicted negative values in upper parts and positive values in lower parts of the debris flow due to variation of magnitude of streamwise buoyancy and drag over the depth.

Key Words : Numerical movable-bed channel, debris flow, volume concentration, buoyancy, drag, gravel shape, solid-liquid multi-phase flow

1. 序論

土石流や洪水時の激しい土砂輸送現象等では、鉛直方向に変化する粒子濃度や水と粒子の速度差の影響を正しく理解することが求められている。主に土石流を対象とした研究において、粒子濃度と粒子群のひずみ速度と粒子間の応力等構成則¹⁾が調べられ、粒子濃度と粒子速度について鉛直二次元の枠組みの中でかなりの程度まで粒子群の挙動を説明できるようになっている。しかし、この枠組みで扱われている現在の土石流の構成則では、水と土砂を同一の速度として取り扱う一流体モデルが用いられている。この考え方は、実用的ではあるが、水と粒子の速度差を取り込むことは難しい状況にある。そのため、水と粒子の運動量と相互作用としての流体力を取り扱える二相流モデルの枠組みで、水流と土砂の相互作用を考慮する必要性が指摘されている²⁾。しかし、実験では、水と粒子に作用する力や、これらの運動を正しく計測することは困難であり、水流と粒子運動の理解は十分

進んでいないのが現状である。

近年、計算機の演算性能の向上を背景に、物体より小さな計算格子を用いた大規模な計算により、物体周りの流れを Euler 的に詳細に解き、解かれた流れ場から物体に作用する流体力を直接求め、物体の運動を個別要素法を用いて Lagrange 的に解析する固液混相流場の解析法が開発されている³⁾。固液混相流場の解析法は、実験では計測が困難な水と粒子に作用する力を推定することを可能にするため、この解析法を用いた数値移動床水路⁴⁾によって、水と粒子の相互作用の力学機構を明らかにすることが期待されている。水と粒子の相互作用を計算力学的アプローチにより考察するためには、実現象に対する解析結果の適合性の確認、および解析に用いる定数が解析結果に及ぼす感度の把握が必要である。しかし、高濃度で水と土砂がともに流下する場において、粒子速度や局所的な粒子濃度の鉛直分布等粒子群の基本的な運動について、計測値を用いた固液混相流解析法の適合性は確認されていない。

これまでに数値移動床水路を用いた研究では、ほとん

どが球で粒子をモデル化している。しかし、個別要素法による内部摩擦角の検討では、個々の粒子間の摩擦角をいくら大きくしても球を用いた解析では、砂の高い内部摩擦角は得ることが出来ないことが指摘されている⁹⁾。これらの結果は、粒子が常に接触しながら、かつ比較的静的に運動している結果であると解釈される。今後、水流と粒子運動の相互作用を数値移動床水路を用いて考察していくには、高濃度の粒子群と水が激しく作用を及ぼし合う場において、水と粒子の運動に接触力の定数がどのような影響を及ぼすか正しく理解する必要がある。

本研究では、最初に伊藤ら¹⁾により固定床土石流水路実験によって計測された粒子速度と粒子の体積濃度の鉛直分布の結果を数値移動床水路で解析する。まず、球を用いて解析し、接触力に関する定数として反発係数と粒子間摩擦角を選び、これらの値を変化させた解析を行う。次に、礫形状の粒子のモデルを用いた解析を行う。解析結果の比較から、接触力に関する定数の変化が、球粒子の解析結果に及ぼす影響を明らかにするとともに、球粒子の解析でこれらの定数を変化させることによって非球形の礫粒子の運動を説明できるかどうかについて検討する。また、伊藤らの実験結果と解析結果の比較から、高濃度粒子群と水の相互作用場における水と粒子運動に対する数値移動床水路の適合性を確認する。最後に実験では計測できない粒子間の応力、水と水の応力、粒子に作用する流体力を、解析結果を用いて推定し、水流と粒子運動の相互作用の力学を考察する。

2. 土石流水路実験の内容

伊藤ら¹⁾は、水路長 12 m、水路幅 0.1 m、勾配 19° の固定床矩形水路を用いて、水と土砂を定常供給し、土砂輸送濃度 c_f が 0.141 から 0.444 まで変化する実験を行い、土石流の運動に関する貴重なデータを得ている。実験に用いた粒子は一樣であり、 $d_{50}=2.18$ mm、内部摩擦角 $\phi=38.7^\circ$ 、静止堆積層の体積濃度 $c_s=0.512$ 、礫粒子の比重 2.62 である。水路底面には、実験に用いた礫を張り付けている。上流端から定常給水し、水路下流端から 6 m 地点で土砂を供給している。下流端で採水し、水の単位幅流出量 q_w と土砂の単位幅流出量 q_s を計測している。下流端付近の流れがほぼ等流となる地点で側壁からビデオ撮影し、画像解析によって粒子速度の鉛直分布を得ている。また、各高さで水と土砂を採水できるサンプラーを用いて、局所土砂輸送濃度を計測し、土砂輸送濃度の鉛直分布を計測している。なお、高濃度の実験ケースでは、サンプラーが目詰まりを起し、局所土砂輸送濃度は計測されていない。本研究では、土砂輸送濃度の鉛直分布の実験結果と解析結果の比較が重要と考え、局所土砂輸送濃度が計測されている Run001 (下流端で計測された土砂輸送濃度($c_f=0.196=q_s/(q_s+q_w)$))を

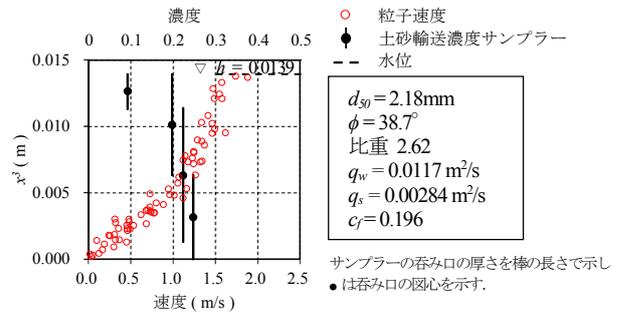


図-1 粒子速度、土砂輸送濃度、水深の計測結果

対象に、実験と同一条件で数値移動床水路を用いた解析を行った。Run001 の計測結果を図-1に示す。なお、数値移動床は、1ケースに少なくとも数週間を要する大規模な解析となる。本研究では、Run001の1ケースを解析対象としたが、今後は、種々の土砂輸送濃度に対する数値移動床の適合性を検討していくことが重要である。

3. 数値移動床水路の解析方法

(1) 水の運動の解析法

水の運動の解析には、石礫部分を密度の異なる流体として取り扱い、固液混相流場の一流体モデルを用いて非圧縮性流れとして解析する。水の運動の解析に用いる連続式、運動方程式は、以下のとおりであり、乱流モデルとして Smagorinsky モデルを用いている。

$$\frac{\partial u^i}{\partial x^i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Du^i}{Dt} = g^i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x^i} + \frac{\partial}{\partial x^j} \{ 2(\nu + \nu_t) S^{ij} \} \quad (2)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 S^{kl} S^{kl}} \quad (3)$$

ここに u^i は、流体計算格子内で質量平均した流速であり、上付きの指標は、各方向成分を示す、 ρ は、格子内で体積平均した密度、 g^i は重力加速度、 p は、圧力と SGS 応力の等方成分の和、 ν は動粘性係数、 S^{ij} は、ひずみ速度テンソル、 C_s は Smagorinsky 定数である。粒子に作用する流体力は、混相流体に作用する式(2)の右辺第 2 項と第 3 項で評価される応力項に密度 ρ を乗じ、粒子部分について体積積分することにより求めている。解析法の詳細は、文献⁹⁾を参照されたい。

(2) 粒子群の運動の解析法

数値移動床水路では、小球を隙間がないように連結させた粒子のモデルを用い、粒子の並進と回転運動は、剛体として解析される⁹⁾。粒子間の接触力は、粒子を形成する個々の小球において、バネ、ダッシュポット、摩擦スライダーを用いて解析される。接触する 2 球間のローカル座標系で定義される法線方向 (n 方向) と、接平面上の直交する 2 方向 (s 方向) のそれぞれで、バネとダッシュポットを並列に配置した Voigt モデルによ

る力を算定する。バネ定数 k は、Hertz の弾性接触理論に基づき見かけ上、変位と力の関係を線形的に表示した式⁷⁾を用いる。ダッシュポットの定数 c は、減衰振動を想定し、反発係数 b と関連づけた式⁸⁾を用いる。

$$k^n = \left\{ \frac{4}{9} \left(\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right) \left(\frac{E}{1 - pos^2} \right)^2 e^n \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$s_0 = \frac{k^s}{k^n} = \frac{1}{2(1 + pos)} \quad (5)$$

$$c^n = 2h \sqrt{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} k^n} \quad (6)$$

$$c^s = c^n \sqrt{s_0} \quad (7)$$

$$h = -\frac{\ln b}{\sqrt{\pi^2 + (\ln b)^2}} \quad (8)$$

ここに上付き添え字の n と s は、それぞれの方向の成分であることを示し、 E は弾性係数、 r_1, r_2 は接触する2球の半径、 pos はポアソン比、 m_1, m_2 は接触する2球の質量である。また、接平面上の接触力 f^s については、Voigt モデルによって算定された力 f_v^s と法線方向の接触力 f^n および粒子間摩擦係数 $\mu_p = \tan(\phi_p)$ を用い、次の様に摩擦スライダーが作用する条件を考慮する。

$$f^s = \text{sign}(f_v^s) \min(|f_v^s|, \mu_p f^n) \quad (9)$$

ここに $\text{sign}(A)$ は A の符号を示すものとし、 $\min(A, B)$ は A と B の小さい方の値をとるものとする。

4. 土石流水路実験の解析

(1) 解析条件

本研究では、伊藤ら¹⁾によって実施された土石流水路実験を対象に、高濃度の粒子と水が激しく相互作用を及ぼす場に対する数値移動床水路の適合性について検討した。また、球を用い、粒子間の接触力に関する定数を変化させたケースと、礫形状粒子を用いたケースについて解析を行った。接触力に関する変化させた定数として、法線方向の力に対する接平面上の方向の力の限界値を既定する粒子間摩擦角 ϕ_p と、エネルギー減衰を既定する反発係数 b を選定した。これらの解析結果と実験結果の比較から、球を用い接触力に関する定数を変化させることで、非球形の礫群の運動の解析可能性を調べた。

解析に用いる水路の水路長は、実験において土砂が流下した区間の 6 m とし、水路幅は実験と同様に 0.1 m とした。実験水路底面には、実験に用いた粒子を張り付けている。解析においても同様に水路底面に粒径 2.18 mm の球を張り付けた。解析では、流下方向に周期境界条件を与えることにより等流状態をつくり、等流の土石流の運動が計測されている実験結果と解析結果の比較を行った。解析の初期水深は、実験水深 0.0139 m を与えた。初期に計算領域内に投入する粒子は、解析領域内の粒子の体積濃度が実験土砂輸送濃度 $c_f = 0.196$ に一致するようにランダムに投入された。

表-1 解析に用いた定数

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$: 流体計算格子サイズ	0.545	mm
Δt : 流体運動計算時間ステップ	1.0×10^{-5}	s
$\Delta t'$: 粒子運動計算時間ステップ	2.0×10^{-7}	s
ρ_w : 水の密度	1,000	kg/m ³
ρ_s : 粒子密度	2,620	kg/m ³
μ_w : 粘性係数	8.9×10^{-4}	Pa·s
C_s : Smagorinsky 定数	0.173	
E : 弾性係数	5.0×10^{10}	Pa
pos : ポアソン比	0.33	
ϕ_p : 粒子間摩擦角	26.6	°
粒子間摩擦角(Case-2)	38.7	°
b : 反発係数	0.70	
反発係数(Case-3)	0.85	
d : 粒径	2.18	mm
流体計算格子数	101,851,750	
粒子数	304,748	

※Case-2, Case-3と記載のある項目は、当該ケースのみに使用した値を示す。

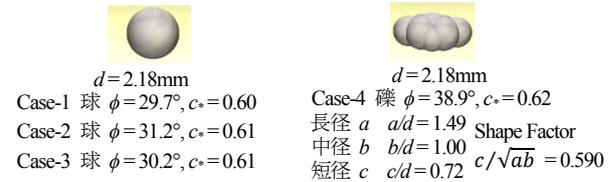


図-2 解析に用いた粒子

まず、著者らの研究⁵⁾において用いられた接触力に関する定数(表-1参照)と同じ定数を用いた球の解析を行った(Case-1)。次に、同じく球を用い、Case-1の定数に対し、粒子間摩擦角を 38.7° に増加させた場合(Case-2)、及び反発係数を 0.85 に増加させた場合(Case-3)のそれぞれについて解析を行った。粒子間摩擦角の 38.7° は伊藤らの実験に用いた粒子の内部摩擦角と同一の値であり、反発係数の 0.85 は、伊藤ら¹⁾が江頭、宮本、伊藤の土石流の構成則を用いて実験結果を説明する際に用いた値である。また、Case-1と同じ定数を用い、球とは異なる礫形状の粒子モデルを用いて数値移動床解析を行った(Case-4)。

Case-4で用いる礫粒子の形状は、一面せん断試験の解析を行い、内部摩擦角 ϕ の解析結果が実験において計測された内部摩擦角 38.7° にできるだけ一致するように9つの小球の配置を調整し、決定した。なお、礫粒子の体積は、直径 2.18 mm の球の体積と等しく設定した。図-2に本研究で用いた粒子モデルと一面せん断試験の解析によって得られた内部摩擦角 ϕ の値を示す。球の内部摩擦角は、粒子間摩擦角、反発係数を変化させても 30° 程度の値となる。静的な粒子運動においては、球の場合、粒子間摩擦角を増加させても内部摩擦角は 30° 程度に収束するというMaeda⁶⁾らの結果と一致している。

(2) 解析結果と実験結果の比較

解析結果の各ケースについて粒子速度、体積濃度、流速の鉛直分布と、実験結果の粒子速度と体積濃度の鉛直分布の比較を図-3に示す。これらは、水路中央線沿いの縦断距離 6 m の解析平均値であり、粒子と水の速度および粒子の濃度分布がほぼ変化しなくなった値を示している。図-4は球を用いた解析結果の代表として

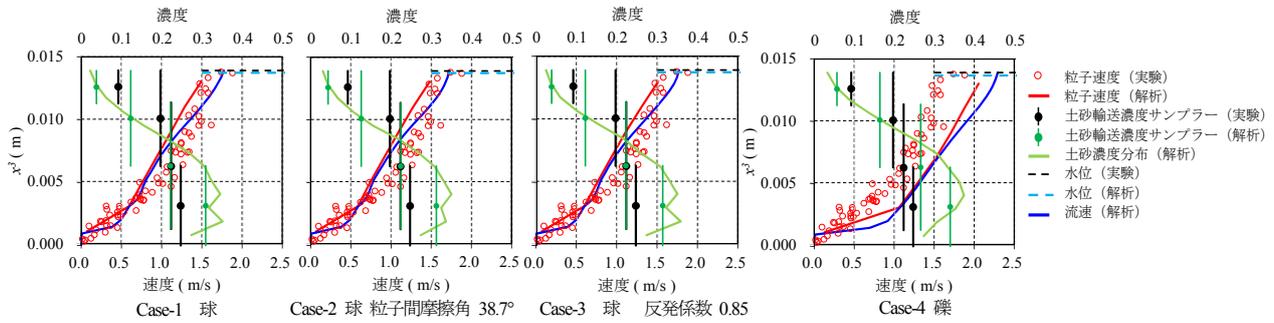


図-3 粒子速度, 粒子濃度, 水速度の鉛直分布

Case-1 と礫の解析結果として Case-4 の粒子の移動と水面の状況を示す. 図には, 本研究の座標軸の定義も示されている. 粒子間摩擦角が異なる Case-1 と Case-2 の結果はほぼ同様の結果を示している. 粒子が静的にせん断変形する場では, 球の場合, 粒子間摩擦角を増加させても回転に対する抵抗は増加しないことが指摘されている⁶⁾が, 離散的に衝突し合う場でも, 同様の状態になっていると考えられる. また, 反発係数が異なる Case-1 と Case-3 の結果もほとんど変わらなかったことから, 対象とした実験条件では, 粒子間の衝突よりも, 流れによるエネルギーの散逸が支配的となっていることが推定される. 一方, 礫を用いた Case-4 の解析結果は, 球を用いた解析と比較すると, 水と粒子の速度と粒子濃度の鉛直分布が異なっている. $x^3 = 0.002 \text{ m}$ の底面の粒子濃度に注目すると, 礫の方が球よりも小さくなっている. これは, 図-4 に示す様に, 礫の場合は, 下流の粒子の回転が, 接触する上流の粒子を持ち上げる効果等があり, 礫は球の様に底面で水平に移動できず, 球ほど密集できないためである. これより, 礫粒子の水流中の運動は, 球粒子間の反発係数や, 粒子間摩擦角を変化させただけでは, 説明できないことがわかる.

実験値との比較で見ると, 解析粒子速度は, 球の場合, 実験結果に対しやや小さく, 礫の場合大きくなっている. 粒子濃度は, 実験値に対し下層でやや大きめに解析されている. これは, 計算に用いた球と礫の静止堆積層の体積濃度 c^* はどちらも 0.6 程度と, 実験の $c^* = 0.512$ に対し, 大きいことが要因として考えられる. また, 粒子速度は球と礫で異なるが, 体積濃度の鉛直分布は球と礫である程度近い分布形となっている. 体積濃度は, c^* に密接に関係すると考えられるが, 解析では, c^* が球と礫で近い値であり, また c^* は実験値に設定できていない. 粒子運動に及ぼす c^* の影響について, 今後さらに調べる必要がある.

図-5 には, 実験において下流端で計測された水と粒子の流出量と, 解析の流出量の比較を示す. 球の場合, 水と土砂の流出量は, ともに実験に対し小さめに, 礫の場合は, 大きめに算定されているも. しかし, 両解析結果ともに実験値に近い値を示している. これらの解析結果は, 球も礫も概ね実験値を捉えている. これより, 数

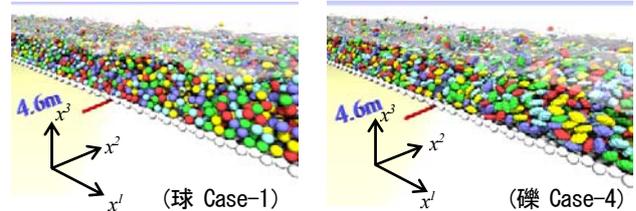


図-4 解析結果の粒子と水面の状況

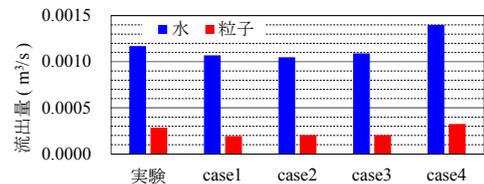


図-5 水と土砂の流出量

値移動床水路は, 土砂輸送濃度が 0.2 程度の高濃度の粒子群と水が相互作用する場において, 上述の課題もあるものの, 水と粒子の運動を概ね説明できることが確認できた. 今後は, 異なる土砂輸送濃度条件に対しても数値移動床水路の適合性を検討することが重要である.

5. 水と粒子群の応力と流体力の鉛直分布

本章では, 前章までの数値移動床水路の解析結果を用いて, 実験では計測することが困難な水と粒子に作用する力を推定し, 水と粒子の相互作用について考察する.

従来の土石流の構成則^{例えは1)}は, 混相流として一流体の枠組みで検討されており, 水と粒子の相互作用としての流体力は式上表れず, 粒子に作用する流体力について十分な検討がなされていない. 水と粒子の相互作用を説明するためには, 流体力を考察し, 水と粒子の個々の相の速度を取り扱う二相流モデルの構築が重要である. 本研究では Euler 型の二相流モデル構築の基礎段階として, 二相流モデルの構成則で必要となる流体力および, 水と水, 粒子と粒子の応力の鉛直分布を, 数値移動床解析結果を基に調べ, 水と粒子がどのような力を受け運動しているのかを明らかにする. ここでは, 実際の粒子形状に近い礫粒子の結果 (Case-4) を用いて検討する.

(1) 水と粒子の応力の鉛直分布

Euler 的表記における水と粒子のそれぞれの連続式と, 運動方程式は, 次の様に表される²⁾.

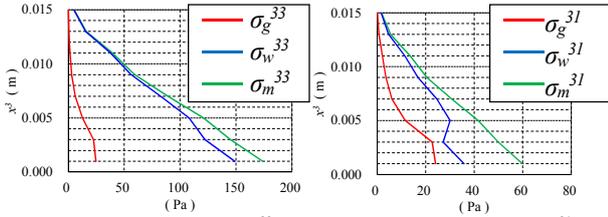


図-6 応力の鉛直分布 σ^{33}

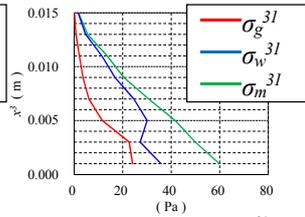


図-7 応力の鉛直分布 σ^{31}

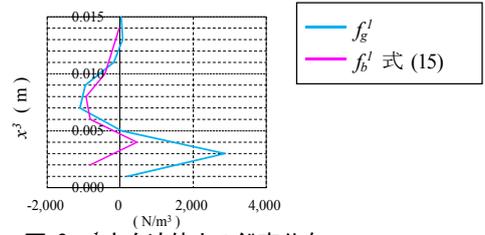


図-8 x^1 方向流体力の鉛直分布

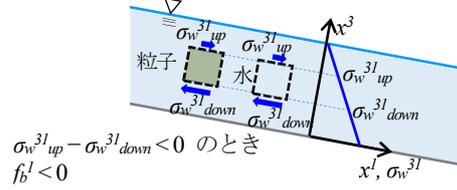


図-9 x^1 方向の拡張浮力の模式図

$$\frac{\partial \alpha_\beta}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_\beta u_\beta^i}{\partial x^i} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \rho_\beta \alpha_\beta u_\beta^i}{\partial t} + \frac{\partial \rho_\beta \alpha_\beta u_\beta^i u_\beta^j}{\partial x^j} = \rho_\beta \alpha_\beta g^i + \frac{\partial \sigma_\beta^{ji}}{\partial x^j} + f_\beta^i \quad (11)$$

ここに β は、水と粒子の相区別を示し、水の相の場合は w 、粒子の相の場合は g である。 α は体積割合、 u^i は i 方向平均速度、 σ^{ji} は応力テンソルで応力と平均速度 u^i による移流では表すことが出来ない乱れによる運動量交換も含む。 f^i は粒子と水の相互作用を表す流体力であり、 $f_g^i = -f_w^i$ の関係にある。伊藤ら¹⁾の実験はほぼ等流状態で行われたことから、等流と仮定し左辺項をゼロと置く。この仮定のもと、式(11)を、応力を求める位置から水面 ($x^3 = x_s^3$)まで積分し、次式により各高さ x^3 の粒子群に作用する応力を解析結果から算出した。

$$\sigma_\beta^{33} = \int_{x^3}^{x_s^3} (\rho_\beta \alpha_\beta g^3 + f_\beta^3) dx^3 \quad (12)$$

$$\sigma_\beta^{31} = \int_{x^3}^{x_s^3} (\rho_\beta \alpha_\beta g^1 + f_\beta^1) dx^3 \quad (13)$$

なお、数値移動床水路において体積割合と相互作用力は、それぞれ各計算格子と各粒子で求められ⁵⁾既知量であり、 α_β 、 f_β^i には同一 x^3 の空間平均値を用いた。水と粒子の応力の算出結果を図-6 および図-7 に示す。水と粒子を区別せず混相流と考えた場合の応力 $\sigma_m^{ji} (= \sigma_g^{ji} + \sigma_w^{ji})$ も図に示した。水路に垂直方向の水の直応力 σ_w^{33} 分布は、ほぼ直線であり、底面圧力は静水圧と仮定した場合の水圧 $129 \text{ Pa} (= \rho_w g h \cos(19^\circ))$ に近い値を示しているため、水の圧力分布は、ほぼ静水圧分布となっていることがわかる。一方、せん断応力を見ると、水のせん断応力 σ_w^{31} は、底面に向かって $x^3 = 0.005 \text{ m}$ 付近で減少に転じている。これは、次節で示す様に、水はこの地点で x^1 の負の方向に粒子群から大きな流体力の反力を受けている。そのため、当該地点の水には、せん断応力 σ_w^{31} の x^3 方向の差と重力が流下方向に作用し、上流向き大きな流体力の反力と釣り合っている。また、固定床上の土石流の場合、下部の方が濃度が低くなる濃度の逆転現象が起こることが知られている¹⁾。本研究でも $x^3 = 0.003 \text{ m}$ 以下で同様の傾向を示している (図-3 Case-4 参照)。そのような地点では、底面に向かって粒子のせん断応力の増加は鈍くなり、それを補うように水のせん断応力は増加する傾向があることがわかった。

(2) 粒子に作用する流下方向の流体力と拡張浮力の鉛直分布

本節では、粒子に作用する流下方向 (x^1 方向) の流

体力を考察する。図-8 には、解析結果より得られた単位空間の粒子に作用する流体力 f_g^1 の鉛直分布を示す。図-3 に示す Case-4 の $x^3 = 0.007 \text{ m}$ 付近の流下方向の粒子速度と流速の関係を見ると、ほぼ同一かやや水の方が大きな速度を示している。しかし、図-8 に示す当該地点の粒子に作用する流体力は、下流向きではなく、上流向きを示している。このことより、水と粒子の速度差だけでは、水流中の粒子に作用する流体力を見積もることが出来ない場合がある。

Armanini²⁾らは、流体力 f_g^i を構成する力のうち、粒子と同一体積の水塊が水の応力によって受ける力が粒子にも作用するとし、その力を以下の式で表している。

$$f_b^i = \alpha_g \frac{\partial \sigma_w^{ji}}{\partial x^j} \quad (14)$$

上式は、清水中の静止粒子に対しては、等方応力の効果のみとなり、浮力に一致するが、運動中では、偏差応力の効果も含む。ここでは、等方応力だけでなく偏差応力にまで拡張したものとして、拡張浮力と呼ぶ。

本研究で対象とする流れは等流状態にあるため、 x^3 方向のみの差分を考えれば式(15)となる。

$$f_b^1 = \alpha_g \frac{\partial \sigma_w^{31}}{\partial x^3} \quad (15)$$

上式によって、得られた拡張浮力の分布を図-8 に示す。式(15)は、図-9 に示す様に、水と同様に粒子が下面と上面で水からせん断力を受け、その差が拡張浮力として粒子に作用することを表している。図-8 の傾向を見ると、 $x^3 = 0.005 \text{ m}$ から上部では、ほぼ式(15)によって見積もられる拡張浮力と粒子に作用している流体力は一致している。これらの考察より、粒子の濃度が比較的小さな $x^3 = 0.005 \text{ m}$ から上部では、拡張浮力により粒子は上流方向に力を受けながら流下しているといえる。また、濃度が高い $x^3 = 0.005 \text{ m}$ 以下の領域では、式(15)の拡張浮力では表現できない速度差による抗力等により、粒子は流下方向に力を受けていると考えられる。これらの考察より、水と粒子が混合して流れる場合、鉛直位置に応じて粒子に作用する流下方向の流体力の向きが変化する複雑な場が現れることが示された。

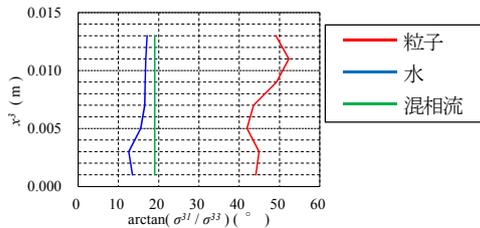


図-10 直応力 σ^{33} とせん断応力 σ^{31} の関係

(3) 粒子の直応力とせん断応力の比率の鉛直分布 (運動中の摩擦角の鉛直分布)

土石流の構成則¹⁾²⁾では、粒子間応力 σ_g^{ij} は、クーロンの破壊基準に従う応力 (クーロン応力と呼ぶ) と、衝突により生じる応力 (衝突応力と呼ぶ) の合計として推定される。クーロン応力と衝突応力の比は、粒子濃度とひずみ速度等を用いて決定され、せん断応力と直応力の関係を示す運動中の摩擦角 $\theta_f = \arctan(\sigma^{31}/\sigma^{33})$ もこれらの変数で決まる。土石流の構成則では、直応力およびせん断応力自体がモデル化の対象であり、運動中の摩擦角は構成則から求まるものの、濃度やひずみ速度との関係について十分な検討がなされていない。しかし、鉛直方向に濃度が変化する中の粒子運動の特長を捉える上では、運動中の摩擦角に及ぼす粒子濃度の影響を理解することは重要である。図-10 には、解析より得られた運動中の摩擦角 θ_f の鉛直分布を示す。参考に水の摩擦角も示した。 $x^3 = 0.07$ m より下部の濃度が高い底面付近では、粒子の運動中の摩擦角 θ_f は、 45° 程度であり、一面せん断試験の摩擦角 $\phi = 38.9^\circ$ よりも大きな値を示しているもののほぼ一定であり、クーロンの関係に近い状態である。一方、 $x^3 = 0.07$ m より上部で粒子の濃度が 0.25 を下回ると (図-3, Case-4 参照) 運動中の摩擦角 θ_f はさらに増加し、 50° 付近まで増加している。これより、粒子の運動中の摩擦角 θ_f は、粒子の濃度が高い場所ではクーロンの法則に従い概ね一定となり、濃度が小さくなると増加する傾向が明かとなった。

本章では、高濃度粒子群と水流の相互作用場において、粒子と水の応力と流体力の鉛直分布形を数値移動床水路の解析結果から推定した。今後は、種々の流れ場で水と粒子の応力と流体力を調べ、水流と粒子運動の関係を検討し、二相流の枠組みで構成則を構築する必要がある。

6. 結論

本研究では、伊藤ら¹⁾によって実施された土石流水路実験を対象とした数値移動床水路の解析とその考察より、以下の主要な結論を得た。

1) 数値移動床水路により、球と礫形状の粒子を用い、土砂輸送濃度が 0.2 程度の高濃度の土石流水路実験を対象に解析した結果、両解析結果は、実験結果の粒子速度と局所土砂輸送濃度の鉛直分布および水と土砂の輸送量を概ね説明出来ることを示した。

2) 球を用い、個別要素法の粒子間摩擦角 (26.6° と 38.7°) および反発係数 (0.7 と 0.85) を変更させた解析、および礫形状の粒子 (粒子間摩擦角 26.6° , 反発係数 0.7) を用いて解析を行った。この結果、球では、反発係数と粒子間摩擦角を変化させても解析結果に大きな差は見られず、球と礫では、粒子と水の速度や濃度について異なる傾向を示した。これより、数値移動床水路を用いて、非球形の実際の礫群の水流中の運動を説明するためには、球群を用い、粒子間摩擦角や反発係数を調整するだけでは不十分で、礫形状を正しくモデル化することが重要である。

3) 粒子に作用する流下方向 (x^l 方向) の流体力の鉛直分布を数値移動床解析結果から推定した。粒子と同一体積の水塊が水から受ける力を拡張浮力とすると、粒子の濃度が小さい上部では、粒子は、水のせん断力差による拡張浮力によって上流向きに流体力を受けていた。また、濃度が大きい水路底面付近では、拡張浮力では説明できない水と粒子の速度差に起因する抗力等によって、粒子は下流向きに力を受けており、粒子に作用する流下方向の流体力は、鉛直位置によって向きを変える複雑な分布となることが明かとなった。

謝辞：本研究を行うにあたり、ICHARMの江頭進治先生、日本工営株式会社の伊藤隆郭氏に貴重な土石流水路実験データをご提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 伊藤隆郭, 江頭進治, 宮本邦明, 竹内宏隆: 土石流の固定床から移動床流れへの遷移過程に関する研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.635-640, 1999.
- 2) Armanini, A., Larcher, M., Nucci, E. and Dumbser, M.: Submerged granular channel flows driven by gravity, *Advances in Water Resources*, 63, pp.1-10, 2014.
- 3) 牛島省, 福谷彰, 牧野統師: 3次元自由水面流中の接触を伴う任意形状物体運動に対する数値解法, 土木学会論文集B, Vol.64, No.2, pp.128-138, 2008.
- 4) 原田英治, 鶴田修己, 後藤仁志: 混合粒径シートフロー漂砂の鉛直分級過程の固液混相型LES, 土木学会論文集 (海岸工学), Vol. 67, No. 2, pp.1_471-I_475, 2011.
- 5) 福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦: 移動床数値実験水路を流下する石礫粒子群の三次元運動, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, pp.1_10151-I_1056, 2013.
- 6) Maeda, K. and Hirabayashi, H.: Influence of grain properties on macro mechanical behaviors of granular media by DEM, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 9, pp. 623-630, 2006.
- 7) 後藤仁志: 数値流砂水理学, pp. 160-163, 森北出版, 2004.
- 8) 川口寿裕, 田中敏嗣, 辻裕: 離散要素法による流動層の数値シミュレーション (噴流層の場合), 日本機械学会論文集, Vol.58, No.551 B, pp.2119-2125, 1992.

(2015. 9. 30受付)